

徐智威, 侯应霞, 顾泽茂. 稻-鸭-虾种养模式水体理化因子周年变化特征及水质模糊综合评价[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(3): 65-73.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.03.008

稻-鸭-虾种养模式水体理化因子周年变化特征 及水质模糊综合评价

徐智威¹, 侯应霞^{1,2}, 顾泽茂^{1,3}

1. 华中农业大学水产学院/双水双绿研究院/长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心,
武汉 430070; 2. 湖北省农业农村厅, 武汉 430070; 3. 湖北洪山实验室, 武汉 430070

摘要 为探究稻-鸭-虾种养模式对水质的影响,于2023年3月至2024年1月在监利市新沟镇双水双绿科研基地对稻-鸭-虾种养模式(rice-duck-crayfish integrated model, RDCI)和稻-虾连作模式(rice-crayfish continuous culture model, RCCC)水体进行连续采样,并分析2种模式在不同时期(养虾期、水稻返青期、稻-鸭共作期、水稻成熟期和越冬期)的水体理化因子变化差异。结果显示:物理因子方面,RDCI模式中水温、溶氧和pH值的全年变化范围分别为3.23~33.50℃、2.42~11.75 mg/L和7.18~8.32,与RCCC基本一致。化学因子方面,RDCI中总氮、总磷、氨氮、硝态氮和化学需氧量的全年变化范围分别为0.54~2.12、0.13~0.50、0.16~0.56、0.06~0.40和5.58~18.35 mg/L,总体呈现先升后降的变化趋势,峰值出现在稻-鸭共作期。与RCCC相比,RDCI在养虾后期水体总氮、总磷、氨氮和硝态氮含量分别降低11.1%、6.1%、14.4%和17.4%;在稻-鸭共作期,上述指标分别上升81%~135%、46%~113%、55%~715%和137%~166%。根据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》对RDCI水质进行模糊综合评价,结果显示RDCI养虾初期、水稻返青期、水稻成熟期和越冬期的水质符合Ⅲ级标准,养虾后期符合Ⅳ级标准,稻-鸭共作期符合Ⅴ级标准。研究表明,与RCCC相比,RDCI在养虾后期降低了水体养分盈余,在稻-鸭共作期补充了水体养分不足,从而提供了更好的水体环境。

关键词 稻-鸭-虾种养模式; 稻-虾连作; 水体理化因子; 水质模糊综合评价

中图分类号 S511;X824 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)03-0065-09

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*),俗称小龙虾,是我国养殖面积和产量最高的淡水经济虾类。稻-虾连作模式(rice-crayfish continuous culture model, RCCC)是小龙虾养殖的主要模式,该模式充分利用了稻田时空和水土资源,让小龙虾在稻田中和水稻互利共生:水稻秸秆为小龙虾提供栖息场所,腐烂后促进浮游生物生长,为小龙虾提供丰富的天然饵料^[1];小龙虾摄食水稻害虫,其粪便和残饵提供肥力,减少农药和化肥的施用量,具有显著的生态、经济和社会效益,即“双水双绿”模式^[2]。另外,RCCC模式中小龙虾在稻田中实现“自繁自养”,解决了小龙虾养殖业快速扩张期的苗种需求,显著降低了养殖成本。然而,长期研究表明,该模式面临两大结构性矛

盾:其一是小龙虾“自繁自养”会造成养殖密度失控,易引发种内资源竞争,迫使过量投喂饲料并加剧水体富营养化^[3];其二是水稻生长期养分供需错位,仍需多次施用化肥,造成水体氮磷元素的剧烈波动^[4]。上述问题影响了RCCC的水环境健康,制约了“双水双绿”模式的绿色发展。

前期研究发现,稻田养鸭通过鸭群生物调控功能可实现多重生态增益:鸭的捕食行为可抑制小龙虾过度繁殖,动态调节种群密度^[5];除草、除虫活动减少农药依赖^[6];鸭粪为系统补充生物肥料,缓解养分阶段性匮乏^[7]。理论上,通过稻、鸭和虾之间的多物种协同作用,可形成“密度调控-养分缓释-水质净化”的闭环。因此,本研究整合稻-虾连作与稻-鸭共作,

收稿日期:2025-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(32270481);湖北洪山实验室重大项目(2021HSZD002);国家重点研发计划项目(2022YFD2400700);湖北省第四批现代农业产业技术体系水产产业技术体系项目(2023HBSTX4-05);湖北省农业科技创新中心项目(2025-621-000-001-029)

徐智威, E-mail: hzauxuzhiwei@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 顾泽茂, E-mail: guzemaomail@mail.hzau.edu.cn

构建稻-鸭-虾种养技术模式(rice-duck-crayfish integrated model, RDCI),形成绿色循环种养农业新模式。然而,该模式下水质的周年动态特征尚不明确,制约了系统的精准管理。

目前,传统水质评价方法常采用单因子指数法或综合污染指数法,难以有效处理水质指标的不确定性与模糊性,而模糊综合评价法通过构建隶属函数和权重矩阵,可更科学地反映复杂种养系统水质等级的动态变化^[8-9]。因此,本研究以RCCC和灌溉渠(irrigation canal, IC)水体为对照,开展RDCI水质的定点监测,分析鸭群引入后RDCI不同时期水体理化因子的变化特征,并利用模糊综合评价法评估其水质等级,旨在为RDCI水质管理提供理论支撑,为该模式的推广提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验场地

试验地点位于湖北省监利市新沟镇华中农业大学双水双绿科研基地(29°59'N, 112°38'E)。该基地建于2018年,总面积33 hm²,基地内设有四十余个中试和小试稻田,长期开展虾稻种养模式创新、品种筛选、绿色防控及水质监测等方面的研究。基地所在地气候条件优越,年平均气温约为15~16℃,年降水量1 100~1 300 mm,是“双水双绿”的核心区域。

1.2 试验田设置

选择基地内相邻的6块RCCC稻田为试验用地,将其中3块改造为RDCI试验田,另3块为RCCC对照田,每块稻田的面积约为4 000 m²。相较于对照田,试验田在外田埂搭建鸭棚,鸭棚通过机耕道与田面相连,便于鸭进入稻田活动;内田埂在稻-鸭共作期用100 cm高的尼龙网搭建围栏,防止鸭逃逸(图1A)。所有稻田四周均设有宽2 m、深1 m的环沟,环沟内设有独立的进水口与灌溉渠相连。

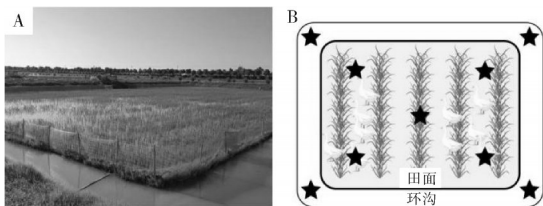


图1 试验田(A)和采样点设置(B)

Fig.1 Experiment fields(A) and sample points(B)

1.3 种养管理

根据稻、鸭、虾的生育期及其对生产季节的需求开展生产管理,将RDCI的生产种养管理分为5个

时期:

3—6月是小龙虾养殖期,4月投放虾苗,5—6月上旬捕捞成虾。养虾期饲料投喂量为1 650 kg/hm²,台田水深0.4~0.6 m,环沟水深约1.9~2.3 m,水深随气温升高逐渐增加。

6月中旬—7月上旬是水稻返青期,6月中旬移栽水稻,品种为华墨香3号,种植密度14 cm×30 cm,每穴5~6株,插秧前施用复合肥450 kg/hm²(N:P₂O₅:K₂O=22:6:12)。

7月中旬—9月初是稻-鸭共作期,在插秧后15 d放入20日龄的试验鸭,180只/hm²,鸭品种为武禽10号(武汉市农科院选育品种)。每天上午06:00将鸭从鸭棚中赶入稻田,活动至下午,18:00收鸭,补食1次(放鸭前期投喂鸭配合饲料,后期投喂稻谷),投喂量为鸭体质量的10%。9月初,水稻抽穗前将鸭回捕。

9—10月是水稻成熟期,本期的生产管理主要是10月下旬收割水稻。整个水稻生育期内不打农药,分别在分蘖末期和成熟期晒田,每次5~7 d,其余时间田面水位保持0.1 m。

11月—翌年2月是越冬育苗期,11月上旬上水淹田,翌年1月种植水草。越冬期台田水深约0.2 m,环沟水深约1.7 m。越冬期间每周根据水温投喂1~3次饲料,每次投喂量约为7.5 kg/hm²。

RCCC的田间管理与RDCI基本一致。但由于对照组不放鸭,导致小龙虾密度较高,养虾期根据小龙虾密度调整饲料投喂量为1 763 kg/hm²。同时,水稻种植期施肥量略高,具体为插秧前施用复合肥450 kg/hm²(N:P₂O₅:K₂O=22:6:12),7月中旬追施尿素75 kg/hm²(含N 46%)。

1.4 样品采集

设定2023年3月至2024年2月为RDCI的1个生产周期,本试验采样在本周期内完成。分别在养虾期(3月、4月、5月)、水稻返青期(6月),稻-鸭共作期(7月、8月)、水稻成熟期(9月)和越冬期(11月、1月)采集水样。采用9点法采样,样点选择为田面5点和环沟4点(图1B),灌溉渠的采样点位于各个田块对应的进水口附近。上午08:00—10:00进行采样,采样前测量水深,确定采水深度。水样采集装置为2.5 L有机玻璃采水器,采样前先用采样点水样进行润洗。在各个点位采集表层(水面下0.1~0.2 m)、中层(水深1/2处)和底层(田面/沟底上方0.1~0.2 m)水样共20 L(若采样点位水深不足0.3 m,则只取

中层水样)。水样采集后混匀,取1 L水用于水体化学因子的测定。

1.5 水体理化因子测定

现场使用便携式水质分析仪(HQ 4300)测定水温(water temperature, WT)、溶氧(dissolved oxygen, DO)和pH。采集500 mL混合水样测定总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD_{Mn});采集500 mL混合水样抽滤(孔径0.22 μm)后测定氨氮(ammonia nitrogen, NH₄⁺-N)和硝态氮(nitrate nitrogen, NO₃⁻-N)。水质指标的测定方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》。

1.6 数据统计与分析

使用软件Microsoft Excel 2019、IBM SPSS Statistics 25.0及GraphPad 8进行数据整理、分析和图表绘制,图表中试验数据均表示为平均数±标准差(mean±SD)。采用单因素方差分析(one-way ANOVA),LSD分析法检验试验组和对照组以及不同时期数据的差异性,取 $P<0.05$ 作为差异显著性判定标准。

1.7 熵权模糊综合评价法

1)确定因子集。选择DO、TN、TP、NH₄⁺-N和COD_{Mn}作为评价因子,构建因子集 $U=\{DO, TN, TP, NH_4^+-N, COD_{Mn}\}$ 。

2)确定评价集。根据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的规定,将水质级别定为5级,构建评价集 $V=\{I, II, III, IV, V\}$ 。

3)确定隶属函数。按照国家标准确定的限值(表1),确定各因子的隶属函数,计算隶属度 $p_{i,j}$,并构造模糊关系矩阵 $p=(p_{i,j})_{m \times n}$ 。

第I级环境质量隶属函数为:

$$p_{Ii} = \begin{cases} 1 & x_i < s_{i,j} \\ (s_{i,j+1} - x_i) / (s_{i,j+1} - s_{i,j}) & s_{i,j} \leq x_i \leq s_{i,j+1} \\ 0 & x_i > s_{i,j+1} \end{cases} \quad (1)$$

第II~IV级环境质量隶属函数为:

$$p_{Ii,j} = \begin{cases} 0 & x_i < s_{i,j-1}, x_i > s_{i,j} \\ (x_i - s_{i,j-1}) / (s_{i,j} - s_{i,j-1}) & s_{i,j-1} \leq x_i \leq s_{i,j} \\ (s_{i,j+1} - x_i) / (s_{i,j+1} - s_{i,j}) & s_{i,j} \leq x_i \leq s_{i,j+1} \end{cases} \quad (2)$$

第V级环境质量隶属函数为:

$$p_{I5} = \begin{cases} 0 & x_i < s_{i,j-1} \\ (x_i - s_{i,j-1}) / (s_{i,j} - s_{i,j-1}) & s_{i,j-1} \leq x_i \leq s_{i,j} \\ 1 & x_i > s_{i,j} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, x_i 表示评价指标 i 的实际监测含量值; $s_{i,j-1}$ 、 $s_{i,j}$ 和 $s_{i,j+1}$ 分别表示第 i 项指标对应的第 $j-1$ 、 j 、

$j+1$ 级水质类别标准值。

表1 水质评价标准

Table 1 Water quality evaluation standard

等级 Grade	DO	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	COD _{Mn}
I	≥7.5	≤0.2	≤0.02	≤0.15	≤2
II	≥6.0	≤0.5	≤0.10	≤0.50	≤4
III	≥5.0	≤1.0	≤0.20	≤1.00	≤6
IV	≥3.0	≤1.5	≤0.30	≤1.50	≤10
V	≥2.0	≤2.0	≤0.40	≤2.00	≤15

4)熵权法确立权重集。步骤1:数据归一化。为了消除不同单位或量级尺度的影响,在赋权之前对水体理化因子的监测数据进行归一化处理,转变为[0,1]区间的数值。对于DO评价指标数值大为优,采用式(1);对于TN、TP等评价指标以数值小为优,采用式(4):

$$r_{i,j} = \begin{cases} (x_{i,j} - x_{jmin}) / (x_{jmax} - x_{jmin}) & (4) \\ (x_{jmax} - x_{i,j}) / (x_{jmax} - x_{jmin}) & (5) \end{cases}$$

$r_{i,j}$ 、 $x_{i,j}$ 为决策样本 i 的第 j 项因子的归一化和初始数值; x_{jmin} 、 x_{jmax} 为各决策样本中第 j 项因子的最大值和最小值。

步骤2:计算因子 j 的信息熵 H_j :

$$H_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m f_{i,j} \ln f_{i,j} \quad (6)$$

$f_{i,j}$ 为决策样本 i 的第 j 项因子所占比例,其中 $i=1, 2, \dots, m$; $f_{i,j} = r_{i,j} / \sum_{j=1}^n r_{i,j}$,若 $f_{i,j}=0$,则 $\ln f_{i,j}=0$,以确保该式有计算意义。

步骤3:计算参评因子 j 的熵权 ω_j :

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (7)$$

ω_j 的取值范围为0~1,并且满足条件 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。

5)水质评价。将模糊关系矩阵 $p=(p_{i,j})_{m \times n}$ 与权重向量 W 利用合成算子进行复合计算,公式如下:

$$B = W \cdot P = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5) \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{m5} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_5) \quad (8)$$

采用加权等级原则对模糊综合评价结果进行向量分析^[8-9],得到评价对象的相对位置,计算公式如下:

$$B_T = \left(\sum_{j=1}^m j B_j^2 \right) / \left(\sum_{j=1}^m B_j^2 \right) \quad (9)$$

式(9)中, b_j 表示评价对象对第 j 级水质标准的隶属度, b_j 的变化范围是 $[1, 5]$ 。当 $b_j < 1.5$ 时,水质为Ⅰ类;当 $1.5 \leq b_j < 2.5$ 时,水质为Ⅱ类;当 $2.5 \leq b_j < 3.5$ 时,水质为Ⅲ类;当 $3.5 \leq b_j < 4.5$ 时,水质为Ⅳ类;当 $b_j \geq 4.5$ 时,水质为Ⅴ类。

2 结果与分析

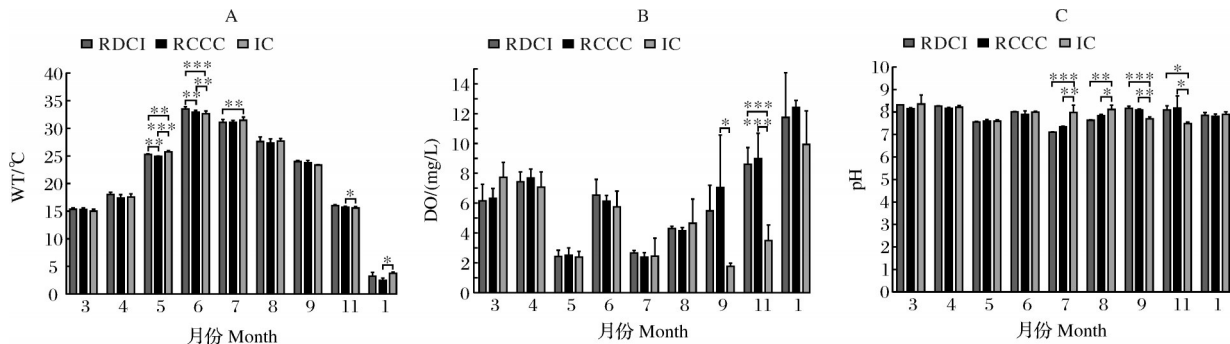
2.1 水体理化因子的变化

1)WT、DO和pH值的变化。WT、DO和pH值的周年变化如图2所示。RDCI、RCCC和IC全年WT变化范围分别为3.23~33.50、2.50~32.90、3.75~32.65℃,三者WT均在6月达到全年最高,1月降至全年最低。

RDCI全年DO的变化范围为2.42~11.75

mg/L,5月DO最低,1月DO最高。RCCC全年DO的变化范围为2.39~12.42 mg/L,全年最高和最低值分别出现在7月和1月,其水体DO的全年变化趋势与RDCI基本一致,各个时期也无显著差异。相比于IC,RDCI和RCCC的DO含量在9月至翌年1月均高于IC,其中RDCI在11月显著高于IC,而RCCC在9月和11月均显著高于IC。

RDCI全年pH值的变化范围为7.18~8.32,7月pH值最低,3月pH值最高。RCCC全年pH值的变化范围为7.31~8.17,7月最低,11月最高。相较于IC,RDCI和RCCC水体pH值在7~8月显著低于IC,且三者pH值大小关系为RDCI<RCCC<IC;而在9月和11月RDCI和RCCC水体pH值则显著高于IC。



*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$,下同。Comparison of data in the figure: * indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$, *** indicates $P < 0.001$. The same as below.

图2 水体物理因子的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of water physical factor

2)TN的变化。如图3A所示,RDCI全年TN的变化范围为0.54~2.12 mg/L。其中,3月((0.54±0.21) mg/L)为全年最低,随后在5月((1.29±0.20) mg/L)、8月((2.12±0.21) mg/L)和11月((1.20±0.04) mg/L)出现3次峰值。RCCC全年TN的变化范围为0.49~1.46 mg/L,峰值和谷值分别出现于5月和4月。与RCCC相比,RDCI在稻-鸭共作期TN含量显著更高,7月和8月分别是RCCC的1.81和2.34倍;而在养虾期与越冬期(5月、6月、11月、1月)则低于RCCC。相较于IC,RDCI中TN含量在4月、6—8月及11月显著高于IC,RCCC则在5月、6月和11月显著高于IC。

3)TP的变化。如图3B所示,RDCI全年TP的变化范围为0.13~0.50 mg/L,全年呈先增后减的变化趋势,峰值和谷值分别出现于8月和1月。相比之下,RCCC全年TP变化较小,变化范围为0.13~0.23 mg/L,峰值和谷值分别出现于5月和11月。在稻-鸭

共作期,RDCI的TP含量显著高于RCCC,7月和8月分别是RCCC的1.46和2.12倍。相比于IC,RDCI和RCCC均在5月、6月和11月显著高于IC。

4)COD_{Mn}的变化。如图3C所示,RDCI全年COD_{Mn}的变化范围为5.58~18.35 mg/L,变化趋势与TN一致。其中,在5月((13.87±4.65) mg/L)、7月((18.35±0.40) mg/L)和11月((10.88±2.64) mg/L)出现3次峰值,9月((5.58±1.32) mg/L)降至全年最低。RCCC全年COD_{Mn}的变化范围为5.18~10.97 mg/L,趋势与RDCI相似,其峰值和谷值分别为5月和9月。对比显示,RDCI的COD_{Mn}含量在稻-鸭共作期显著高于RCCC,7月和8月分别是RCCC的1.78和2.10倍。相较于IC,RDCI和RCCC的COD_{Mn}含量在全年不同月份均大于IC,其中在4月、7月、8月和11月具有显著差异。

5)NH₄⁺-N的变化。如图3D所示,RDCI全年NH₄⁺-N的变化范围为0.16~0.56 mg/L,呈先升后

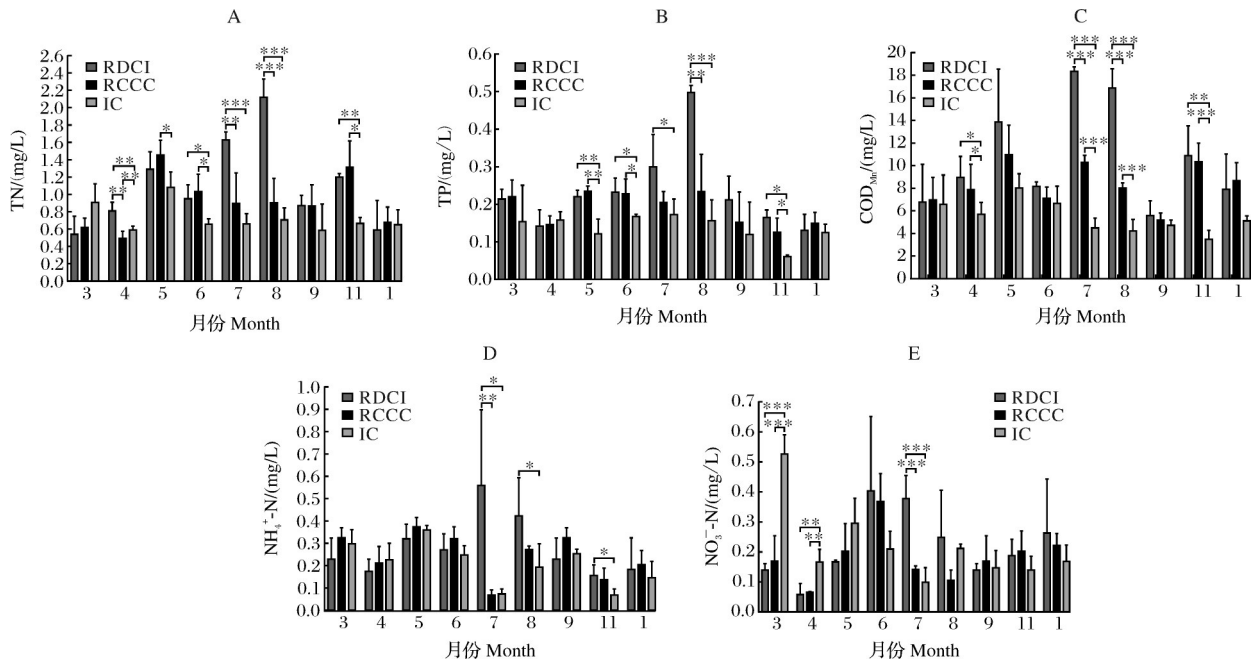


图3 水体化学因子的动态变化

Fig.3 Dynamic changes of water chemical factors

降趋势,峰值和谷值分别出现于7月和11月。RCCC全年 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化范围为0.06~0.37 mg/L,其峰值和谷值分别为5月和7月。相比于RCCC,RDCI在稻-鸭共作期(7-8月)显著高于RCCC,7月浓度达RCCC的8.15倍;在养虾期、水稻返青期和越冬后期低于RCCC。相较于IC,RDCI的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在7-8月和11月显著更高,而在养虾期较低。

6) $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化。如图3E所示,RDCI全年 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变化范围为0.06~0.40 mg/L,最高值和最低值分别出现于7月和4月。不同时期变化来看,RDCI的水体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈现先增后减再增的变化趋势。具体而言, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在养虾期上升,稻-虾接茬期施用种稻基肥后,在水稻返青期升至全年最高,随后在稻-鸭共作期和水稻成熟期持续降低,越冬期随着秸秆泡水腐烂, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量又显著上升。RCCC全年 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化范围为0.07~0.36 mg/L,变化趋势与RDCI一致,同样在7月和4月达到全年最高和最低值。差异在于,RCCC在7月降幅更显著,且浓度显著低于RDCI。与IC相比,RDCI和RCCC在养虾期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量低于IC,其中4月和5月差异达显著水平。

2.2 RDCI水质模糊综合评价

根据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》开展RDCI的水质评价,不同时期水质模糊综合评价结果见表2。结果表明,养虾期 B_T 值从3月的2.239升

高至5月的3.810,水质从Ⅱ类降为Ⅳ类;水稻返青期 B_T 值降至2.546,水质恢复至Ⅲ类;稻-鸭共作期 B_T 值升高,变化范围为4.054~4.643,水质降为Ⅳ~Ⅴ类;鸭离田后 B_T 值降低至2.740,水质恢复为Ⅲ类;越冬期 B_T 值的变化范围为1.601~1.908,1月降至全年最低,水质恢复为Ⅱ类。

3 讨论

3.1 养虾期的水质变化特征

水体是RDCI中重要的环境因素,其质量直接影响种养殖物的生长发育,尾水外排后还会影响周边河流、湖泊和湿地等自然水体^[10-11]。因此,监测水体理化因子并识别关键调控因子,对保障该模式的农业生产和水质安全至关重要。研究显示,RDCI水体理化因子受温度、投入品使用和生产管理等因素影响,呈现显著的阶段性变化特征。WT是水产动物生长的关键限制因子,小龙虾最适生长温度为20~30℃,WT低于5℃或高于35℃时摄食活动显著受抑^[12-13]。本研究中,RDCI和RCCC养虾期WT在15~25℃波动,处于适宜范围。小龙虾偏好弱碱性环境,当pH值低于6时,小龙虾摄食率下降且死亡率升高^[14]。本研究中,2种模式养虾期pH值处于小龙虾适宜区间,但养虾后期因阴雨天气频发导致浮游植物光合作用减弱,pH值逐渐降低。DO是小龙虾生长的关键指标。研究显示,小龙虾的窒息点为

表 2 模糊综合评价结果

Table 2 The results of fuzzy comprehensive evaluation

时期 Stages	月份 Months	隶属度 Membership degree					B_T	水质等级 Water quality grade
		I	II	III	IV	V		
养虾期 Crayfish farming	3月 Mar.	0.170	0.450	0.320	0.060	0.000	2.239	II
	4月 Apr.	0.410	0.218	0.254	0.119	0.000	1.745	II
	5月 May	0.104	0.099	0.244	0.293	0.260	3.810	IV
水稻返青期 Rice regreening	6月 June	0.215	0.241	0.392	0.152	0.000	2.546	III
稻-鸭共作期 Rice-duck co-cultivation	7月 July	0.000	0.179	0.024	0.506	0.291	4.054	IV
	8月 Aug.	0.045	0.158	0.150	0.081	0.566	4.643	V
水稻成熟期 Rice mature	9月 Sep.	0.157	0.243	0.575	0.024	0.000	2.740	III
越冬期 Overwintering	11月 Nov.	0.431	0.074	0.253	0.214	0.028	1.908	II
	1月 Jan.	0.415	0.324	0.184	0.077	0.000	1.601	II

0.061 mg/L,当水体 DO 大于 1.5 mg/L 时可维持其正常代谢^[15]。本研究中,RDCI 和 RCCC 养虾初期 DO 较高,但后期降至 2.42 mg/L。尽管该值仍高于小龙虾窒息点,但长期低氧环境会增加白斑综合症风险^[16]。值得注意的是,IC 中 DO 在养虾后期低于种养系统,表明高温和低气压是 DO 下降的主因^[17]。氮磷是水生生物生长的营养基础。饲料是养虾期氮磷和有机质的主要输入源^[5]。本研究中,随着小龙虾养殖的进行,RDCI 和 RCCC 水体 TN 和 COD_{Mn} 含量显著升高,且养殖中后期增幅高于初期,这与小龙虾摄食量增加导致残饵和粪便累积相关。同时,水体 NH₄⁺-N 含量也随着养殖进程而增加。水体 NO₃⁻-N 由 NH₄⁺-N 经硝化作用转化而来,养殖后期 WT 上升促进细菌硝化作用,进而导致 NO₃⁻-N 含量增加^[18]。

稻田种养尾水达标排放是人们关注的热点。RDCI 和 RCCC 系统养虾期结束的尾水排放量占比超全年总排水量的 60%^[5]。基于 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的水质模糊综合评价显示,RDCI 养虾后期水质等级达到Ⅳ级标准,其 TN、TP 和 COD_{Mn} 含量也符合 SC/T 9101—2007《淡水池塘养殖水排放要求》Ⅰ级标准(TN≤3.0 mg/L、TP≤0.5 mg/L 和 COD_{Mn}≤15 mg/L),且 TN 和 COD_{Mn} 含量与同期 IC 水质无显著差异,表明其对周围水体影响可控。与 RCCC 相比,RDCI 中养虾后期的水质情况更优,TN、TP、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量分别降低 11.1%、6.1%、14.4% 和 17.4%。这主要是由于 RDCI 通过鸭群生物调控减少小龙虾

“自繁自养”,显著降低了次年虾苗密度^[5]。在养虾期精准投放虾苗后,RDCI 能精确控制饲料用量,减少营养物质的输入,从而降低水体营养化程度。

3.2 种稻期的水质变化特征

RDCI 的水稻种植时期划分为水稻返青期、稻-鸭共作期和水稻成熟期 3 个阶段。水质监测表明,返青期和成熟期水质均达到Ⅲ级标准,这与水稻对氮磷的吸收效应有关。对比水稻返青和水稻成熟 2 个时期,RDCI 和 RCCC 水体中的氮磷含量降低,且成熟期与 IC 中的氮磷含量基本持平,该趋势与稻-虾共作体系的水质变化趋势一致^[19-20]。稻-鸭共作期覆盖水稻分蘖至拔节期,其呈现独特水质特征,具体表现为 pH 值显著降低,DO 和 TN、TP、NH₄⁺-N、COD_{Mn} 等的含量显著升高,这与多项关于稻-鸭共作水质的研究结果一致^[21-23]。甘德欣等^[22]研究表明,鸭在田间的活动能够增加 38.4%~44.7% 的水体 DO。本研究中,RDCI 稻-鸭共作期水体 DO 不仅高于 RCCC,且随着鸭的生长呈上升趋势,表明鸭群耘田作用促进空气-水界面的氧交换^[23]。水体 pH 值会影响水稻生长,偏中性的水体更有利于水稻对养分和微量元素的吸收^[24-25]。RDCI 稻田水体的 pH 值在鸭进入稻田后显著降低,最低达到 7.10,有利于水稻生长。水体 pH 值的降低一方面是由于鸭群活动导致水体悬浮物增加,抑制浮游植物光合作用,减少 CO₂ 消耗;另一方面是鸭粪尿混合物(含高浓度尿酸氮)进入稻田后降低了水体碱度。值得注意的是,稻-鸭共作期恰逢水稻氮磷需求高峰。RDCI 中鸭群扰动

将养虾期沉积的残饵粪便和土壤有机质重新悬浮释放^[26],鸭粪还田进一步增加稻田水体的氮磷含量。这使得RDCI稻-鸭共作期的水体氮磷和有机质含量较水稻返青期显著增加,而RCCC水体中的养分含量呈下降趋势,表明RDCI可有效缓解RCCC种稻期养分不足的问题。但需要注意的是,稻-鸭共作期的水质处于Ⅳ~Ⅴ级标准(全年最低),且氮磷和有机质含量显著高于IC。因此,需要注意RDCI稻-鸭共作期稻田水体外排造成的营养元素流失问题。建议加强稻-鸭共作期的水分管理,在分蘖末期晒田时,稻田水体以自然落干至环沟为宜。同时,可以在环沟和排水渠中种植水草净化水质。

3.3 越冬期的水质变化特征

越冬期的生产管理主要是上水淹田和培育虾苗,期间的生产操作和投入品使用较少,仅投喂少量饲料保障小龙虾幼苗的孵化和生长。与Yu等^[20]报道的稻-虾模式类似,本研究中RDCI和RCCC水体TN、NO₃⁻-N和COD_{Mn}含量在11月均显著上升,但是整体的上升幅度较小,整体水质未超出Ⅱ级标准阈值。这一差异可能源于“双水双绿”技术体系对水稻秸秆的精准调控:越冬期秸秆被堆垛处理,同时分次灌水进入稻田,使得秸秆中的易溶性有机物和无机矿质养分能够分批释放,避免传统淹田模式中单次灌水导致的氮磷养分的集中释放^[2]。此外,越冬期稻田的DO水平随WT降低而上升至全年最高,pH值也处于小龙虾幼苗适宜的区间范围。这种良好的水质条件为小龙虾幼苗的孵化和生长提供了有力保障。

本研究对比分析了RDCI、RCCC和IC中水体理化因子的动态变化特征。RDCI中全年水体氮磷和有机质含量呈先增后减的变化趋势,峰值出现在稻鸭共作期。与RCCC相比,RDCI在养虾后期降低了水体养分盈余,在稻-鸭共作期补充了水体养分不足。与IC相比,RDCI养虾后期水质除TP外无显著差异且符合养殖水排放标准,但稻-鸭共作期的氮磷和有机质含量显著升高,水质仅符合Ⅳ~Ⅴ级标准,需要注意水体外排造成的营养元素流失问题。总体而言,RCCC中引入鸭群形成RDCI模式能优化虾稻田的水体理化环境,增强养分的时空耦合,但在关键时期需加强水质监控和管理,以减少潜在的环境风险。

参考文献 References

- [1] 彭成林,徐大兵,周勇,等.小龙虾扰动下水稻秸秆腐解及养分释放和表面结构变化特征[J].华中农业大学学报,2024,43(3):214-219.PENG C L,XU D B,ZHOU Y, et al.Characteristics of straw decomposition,nutrient release and structural changes of rice under disturbance from crayfish[J] Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(3): 214-219 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张启发.“双水双绿”产业发展的理论与实践[M].北京:科学出版社,2021:8-9.ZHANG Q F.Theory and practice of “Shuangshui Shuanglü” (two-aquatics and double-green) industry development [M]. Beijing: Science Press, 2021: 8-9 (in Chinese).
- [3] 曹凑贵,江洋,汪金平,等.稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J].中国生态农业学报,2017,25(9):1245-1253.CAO C G,JIANG Y,WANG J P, et al.“Dual character” of rice-crayfish culture and strategies for its sustainable development [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2017, 25(9): 1245-1253(in Chinese with English abstract).
- [4] ZHANG W Y,XU M S,MA T Q, et al.Optimal fertilization strategy promotes the sustainability of rice - crayfish farming systems by improving productivity and decreasing carbon footprint[J/OL].Agronomy for sustainable development, 2024,44(3): 32[2025-04-13].https://doi.org/10.1007/s13593-024-00952-w.
- [5] 胡鉴轩.稻-鸭-虾模式中鸭品种筛选和氮磷平衡与循环的研究[D].武汉:华中农业大学,2024.HU J X.Studies on screening duck varieties and nitrogen and phosphorus balance and cycle of rice-duck-crayfish integrated system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024 (in Chinese with English abstract).
- [6] ZHANG J E,XU R B,CHEN X, et al.Effects of duck activities on a weed community under a transplanted rice - duck farming system in Southern China[J].Weed biology and management,2009,9(3):250-257.
- [7] TENG Q,HU X F,CHENG C, et al.Ecological effects of rice-duck integrated farming on soil fertility and weed and pest control[J].Journal of soils and sediments,2016,16(10):2395-2407.
- [8] 邹志红,孙靖南,任广平.模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J].环境科学学报,2005,25(4):552-556.ZOU Z H,SUN J N,REN G P.Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J].Acta scientiae circumstantiae, 2005, 25(4): 552-556 (in Chinese with English abstract).
- [9] 闫翔,郭中华,王颖,等.熵权模糊改进法在宁夏黄河水质评价中的应用[J].黑龙江科学,2024,15(6):60-64.YAN X, GUO Z H, WANG Y, et al.Application of entropy weight

- fuzzy improvement method in water quality evaluation of Yellow River in Ningxia[J]. Heilongjiang science, 2024, 15(6): 60-64(in Chinese).
- [10] 倡国涵,袁家富,彭成林,等. 稻虾共作模式下小龙虾养殖对水体环境的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(23): 299-303. SI G H, YUAN J F, PENG C L, et al. Effect of crayfish aquaculture on water environment under integrated rice-crayfish system[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2019, 47(23): 299-303(in Chinese with English abstract).
- [11] LIU C H, HU N J, SONG W X, et al. Aquaculture feeds can be outlaws for eutrophication when hidden in rice fields? a case study in Qianjiang, China[J/OL]. International journal of environmental research and public health, 2019, 16(22): 4471 [2025-04-13]. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224471>.
- [12] 倪静静. 水温、pH和饲料对克氏原螯虾摄食行为及其肉质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2016. NI J J. Effects of water temperature, pH and fodder on feeding behavior and meat quality of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016(in Chinese with English abstract).
- [13] ESPINA S, DIAZ HERRERA F, BÜCKLE R L F. Preferred and avoided temperatures in the crawfish *Procambarus clarkii* (Decapoda, Cambaridae)[J]. Journal of thermal biology, 1993, 18(1): 35-39.
- [14] ZENG Q H, LUO M Z, QIN L R, et al. Growth performance, enzyme activities and metabolite level response to low pH stress in juvenile red swamp crayfish *Procambarus clarkii* [J/OL]. Aquaculture reports, 2024, 39: 102481 [2025-04-13] <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2024.102481>.
- [15] 温小波, 库天梅, 罗静波. 温度、体重及摄食状态对克氏原螯虾代谢的影响[J]. 华中农业大学学报, 2003, 22(2): 152-156. WEN X B, KU Y M, LUO J B. Effects of temperature, body weight and feeding on metabolism of *Procambarus clarkii* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2003, 22(2): 152-156(in Chinese with English abstract).
- [16] MILLARD R S, ELLIS R P, BATEMAN K S, et al. How do abiotic environmental conditions influence shrimp susceptibility to disease? a critical analysis focussed on White Spot Disease [J/OL]. Journal of invertebrate pathology, 2021, 186: 107369 [2025-04-13]. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2020.107369>.
- [17] EHEART J W, PARK H. Effects of temperature variation on critical stream dissolved oxygen[J]. Water resources research, 1989, 25(2): 145-151.
- [18] ZENG J, ZHAO D Y, YU Z B, et al. Temperature responses of ammonia-oxidizing prokaryotes in freshwater sediment microcosms[J/OL]. PLoS One, 2014, 9(6): e100653 [2025-04-13]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100653>.
- [19] 梁宇辉. “双水双绿” 稻虾种养模式水质变化和养分收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. LIANG Y H. Studies on water quality changes and nutrients budgets of rice-crayfish integrated model under the "Shuangshui Shuanglü" concept [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [20] YU J X, REN Y, XU T, et al. Physicochemical water quality parameters in typical rice-crayfish integrated systems (RCIS) in China[J]. International journal of agricultural and biological engineering, 2018, 11(3): 54-60.
- [21] 全国明, 章家恩, 陈瑞, 等. 稻鸭共作对稻田水体环境的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2023-2028. QUAN G M, ZHANG J E, CHEN R, et al. Effects of rice-duck farming on paddy field water environment [J]. Chinese journal of applied ecology, 2008, 19(9): 2023-2028(in Chinese with English abstract).
- [22] 甘德欣, 黄璜, 蒋廷杰, 等. 免耕稻-鸭复合系统减少甲烷排放及其机理研究[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2): 1-6. GAN D X, HUANG H, JIANG T J, et al. Decrease in CH₄ emission and its mechanism in no-tillage rice-duck complex system [J]. Rural eco-environment, 2005, 21(2): 1-6(in Chinese with English abstract).
- [23] XU G C, LIU X, WANG Q S, et al. Integrated rice-duck farming mitigates the global warming potential in rice season [J]. Science of the total environment, 2017, 575: 58-66.
- [24] HUANG L H, LIU X, WANG Z C, et al. Interactive effects of pH, EC and nitrogen on yields and nutrient absorption of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Agricultural water management, 2017, 194: 48-57.
- [25] ALAM S M. Effects of solution pH on the growth and chemical composition of rice plants [J]. Journal of plant nutrition, 1981, 4(3): 247-260.
- [26] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统中稻田面水的N素动态变化及淋溶损失[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 2125-2132. LI C F, CAO C G, WANG J P, et al. Dynamic variations and losses of N in floodwater of paddy fields in integrated rice-duck and rice-fish ecosystems [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2008, 28(10): 2125-2132(in Chinese with English abstract).

Characteristics of annual changes in water physicochemical factors and fuzzy comprehensive evaluation of water quality in rice-duck-crayfish integrated model

XU Zhiwei¹, HOU Yingxia^{1,2}, GU Zemao^{1,3}

1.College of Fisheries/Shuangshui Shuanglü Institute/Ministry of Education Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Hubei Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China;

3.Hubei Hongshan Laboratory, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The effects of the rice-duck-crayfish integrated model (RDCI) on the water quality, continuous sampling and testing of water in RDCI, rice-crayfish continuous culture model (RCCC) were studied at the Shuangshui Shuanglü Research Base in Xingou Town, Jianli City from March 2023 to January 2024. The differences in the changes of water physicochemical factors during different stages including crayfish farming stage, rice regreening stage, rice-duck co-cultivation stage, rice mature stage, and overwintering stage for the two models were analyzed. The results showed that the range of annual variation in water temperature, dissolved oxygen, and pH in RDCI was 3.23-33.50 °C, 2.42-11.75 mg/L, and 7.18-8.32, basically consistent with that in RCCC. The range of annual variation in the content of total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, and COD_{Mn} in RDCI was 0.54-2.12 mg/L, 0.13-0.50 mg/L, 0.16-0.56 mg/L, 0.06-0.40 mg/L, and 5.58-18.35 mg/L, having an overall trend of first increasing and then decreasing and a peak value at the stage of rice-duck co-culture. The content of TN, TP, NH₄⁺-N, and NO₃⁻-N in the water of RDCI at the late stage of crayfish farming decreased by 11.1%, 6.1%, 14.4%, and 17.4%, compared with that of RCCC. The indexes mentioned above in RDCI at the stage of rice-duck coexistence increased from 81% to 135%, 46% to 113%, 55% to 715%, and 137% to 166%, respectively. The water quality of RDCI met the class III standard during the initial crayfish farming, rice regreening, rice maturity, and overwintering stages, met the class IV standard during the later crayfish farming stage, and met the class V standards during the rice-duck co-culture stage according to the comprehensive fuzzy evaluation of water quality based on the “*Environmental Quality Standards for Surface Water*” (GB 3838—2002). It is indicated that RDCI reduces the surplus of water nutrients at the late stage of crayfish farming and replenishes the nutrient deficiency in the water at the stage of rice-duck co-cultivation to provide a better water environment compared with RCCC.

Keywords rice-duck-crayfish integrated model (RDCI); rice-crayfish continuous culture model (RCCC); physicochemical factors of water; fuzzy comprehensive evaluation of water quality

(责任编辑:陆文昌)